



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL**

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR PARA  
LOCALIDADES ÚMIDAS E SEMIÁRIDAS**

**MARIA ARCELINA PONTES DE ARAÚJO**

**AREIA - PB**  
**JULHO DE 2018**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL**

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR PARA AS  
LOCALIDADES ÚMIDAS E SEMIÁRIDAS**

**Maria Arcelina Pontes de Araújo**

**Orientando**

**Prof. Dr<sup>a</sup>. Valéria Peixoto Borges**

**Orientadora**

**Areia PB**  
**Julho de 2018**

**MARIA ARCELINA PONTES DE ARAÚJO**

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR PARA AS  
LOCALIDADES ÚMIDAS E SEMIÁRIDAS**

Trabalho de Graduação apresentado à  
Coordenação do Curso de Agronomia da  
Universidade Federal da Paraíba Centro de  
Ciências Agrárias, em cumprimento às  
exigências para a obtenção do título de  
Engenheira Agrônoma.

**ORIENTADORA: Prof. Dr<sup>a</sup>. Valéria Peixoto Borges**

**AREIA – PB  
JULHO DE 2018**

## **Catálogo na publicação**

### **Seção de Catalogação e Classificação**

A663a Araujo, Maria Arcelina Pontes de.

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR  
PARA LOCALIDADES ÚMIDAS E SEMIÁRIDAS / Maria Arcelina  
Pontes de Araujo. - João Pessoa, 2018.

34f. : il.

Orientação: VALÉRIA PEIXOTO BORGES.

Monografia (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Radiação global, temperatura do ar, nebulosidade. I.  
BORGES, VALÉRIA PEIXOTO. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

**MARIA ARCELINA PONTES DE ARAÚJO**

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR PARA  
LOCALIDADES ÚMIDAS E SEMIÁRIDAS**

MONOGRAFIA APROVADA EM: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Dra. Valéria Peixoto Borges - Orientador

DSER/CCA/UFPB

---

Prof. Dr. Robson Sousa Nascimento – Examinador

DSER/CCA/UFPB

---

Prof. Dr. Péricles de Farias Borges – Examinador

DCFS/CCA/UFPB

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais biológicos*

*Josué Lucas e Margarida Félix*

*E aos meus pais do coração,*

*meu irmão Ramon e minha cunhada Ana Lúcia*

*Por todo esforço, aprendizado e zelo durante toda a minha vida.*

**DEDÍCO**

## AGRADECIMENTOS

Após trilhar toda essa jornada o maior sentimento que poderia carregar no coração é a gratidão. Chego a esse capítulo final agradecendo primeiramente a Deus, por ter sido tão

grandioso e fiel e por ter me proporcionado essa grande experiência. Chego ao final da graduação em Agronomia com uma gigantesca bagagem, não só intelectual, mas de vida. Agradeço a Deus a sabedoria, a força e o sustento em todos os momentos e por sempre ter sido meu melhor amigo e não ter me deixado desistir. Obrigada paizinho.

Agradeço ao meu pai Josué Lucas (*in memoriam*), que mesmo não tendo a sua presença física a sua memória de pai sempre me fez querer lutar ainda mais pelos meus sonhos e dar o melhor de mim. Á minha mãe, Margarida Félix que mesmo não tendo nunca estudado sempre me incentivou a subir mais um degrau, essa mulher que com tanto esforço sempre deu o melhor por mim e pra mim, essa mulher filha de agricultores que ensinou que o mais precioso na vida nenhum currículo Lattes se equipara, essa mulher de fibra, coragem e de tamanha fortaleza que mesmo enfrentando tantos problemas sempre esteve ao meu lado, eu te amo mãe, nunca terei como agradecer.

Aos meus pais do coração, meu irmão Ramon e minha cunhada/mãedrinha Ana, que em toda a minha vida fizeram tanto por mim, me ensinaram tanto da vida, me acolheram como filha e parte da família. Vocês além de referenciais na sua trajetória profissional para mim são referenciais de vida, obrigada pela melhor educação que eu poderia sonhar, obrigada por toda ajuda em todos os aspectos da minha vida, obrigada pelo alicerce e por todas as oportunidades, amo muito vocês e eternamente agradecerei.

Ao meu namorado, grande amigo e companheiro Rodolfo. Que nesses últimos meses nessa minha constante contagem regressiva esteve ao meu lado a todo instante me dando todo o suporte necessário pra chegar até aqui, me cobrando a cada instante os resultados de um sonho meu que se tornou nosso e sempre acreditando no meu potencial, acreditando em mim. Obrigada, amor. Você é um presente de Deus pra minha vida!

A minha família por sempre estarmos juntos em todas as minhas conquistas, a todos vocês Pontes e Araújo, muito obrigada. Em especial meus coroas favoritos: Cecilia, Erika, Renata e Vitor, por serem minha distração e minha fortaleza incondicional em todos os momentos, amo vocês. E as minhas sobrinhas Rallianny e Ramonna por até mesmo nem fazendo ideia me davam gás pra vencer mais um obstáculo, obrigada pelos conselhos e por fazerem tanto por mim, amo muito vocês e sou extremamente grata.

Á minha orientadora a Dra. Valéria Peixoto Borges, por toda paciência, compreensão, ajuda, suporte e principalmente por ter visto em mim além do que eu mesma poderia ver.

Após esses quatro anos de orientação eu aprendi muito e tive a oportunidade de ter como orientadora um ser humano maravilhoso, que esteve comigo nos piores, melhores momentos e até mesmo nos de indecisões (que foram tantos) sempre me aconselhando da melhor maneira possível e me fazendo entender que tudo tem seu tempo certo pra acontecer. Desde o nosso primeiro contato em sala de aula eu lhe tive como norte e desejei um dia ser pelo menos um terço da profissional que sempre mostrou ser, obrigada por tudo Prof.

Aos amigos adquiridos esses anos todos em Areia, a todos amigos da minha turma 2012.1 e em especial meus meninos amados: Allan, Geovane, Kennedy, Mateus, Murilo, Rayan e Zé Luiz. As minhas companheiras de quarto Ana Beatriz (Bia) e Annie, por terem feito essa odisséia ser mais leve sabendo que tenho com quem compartilhar os altos e baixos tão intensos dessa universidade. A minha companheira desde do início do curso Michelly Fernandes, que mesmo com tantas reviravoltas nessa caminhada chamada vida sempre encontramos o caminho de volta uma para a outra. Como Areia não poderia ser mais surpreendente, nos quarenta e cinco minutos do segundo tempo esbarrei no meu amiguinho Anderson Rodrigo, esse menino que me fez enxergar a vida com outros olhos e me fez aprender tanto em tão pouco tempo, um coração enorme com um maneira de ser peculiar (que me tira do sério) mas, foi onde encontrei um irmão de almas. E falando sobre acontecimentos inesperados não poderia esquecer da minha amiga Daniele Marques (minha Dani) que foi Deus quem a colocou na minha vida pra fazer suportável esses últimos meses depois da partida de tantos. Por fim, não menos importante meu amigo Joãozinho, que esteve ao meu lado direta ou indiretamente todo esse tempo me dando apoio, conselhos e principalmente gás pra tentar mais um pouco, pra não desistir tão fácil e por sempre me lembrar que posso mais. A todos vocês meu muito obrigada.

Aos professores aos quais tive a oportunidade de conhecer nesses anos e em especial aos professores: Ademar, Aline, Laís, Lenyneves e Bruno, por, nessa reta final, terem feito tanto por mim diante de tantas adversidades em minha vida e por terem me ajudado a chegar a esse dia o qual tanto sonhei, muito obrigada professores.

## SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>9</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>10</b>



<b>RESUMO.....</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Geral .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Especificos .....</b>	<b>15</b>
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1. Radiação Solar .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2. Modelos de estimativa .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3. Indices de desempenho .....</b>	<b>18</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>198</b>
<b>4.1.Dados meteorológicos.....</b>	<b>198</b>
<b>4.2.Localização e Caracterização da Área de Estudo.....</b>	<b>18</b>
<b>4.3Qualidade dos dados de radiação solar .....</b>	<b>18</b>
<b>4.4Modelos de estimativa .....</b>	<b>19</b>
<b>4.5.Indicadores de desempenho .....</b>	<b>20</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>221</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>28</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>288</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Gráficos de regressão linear ( $R^2$ ) entre radiação solar observada e estimada para os modelos de estimativa onde A,B e C são para a localidade de Uruçui-PI e D, E e F são para a localidade de João Pessoa – PB. ....	<b>26</b>
--	-----------

## **Lista de Tabelas**

<b>Tabela 1:</b> Valores de médias, máximos e mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) para dados observados e para os modelos de estimativa de radiação solar para Uruçui-PI.....	23
<b>Tabela 2:</b> Valores de médias, máximos e mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) para dados observados e para os modelos de estimativa de radiação solar para João Pessoa-PB. ....	24
<b>Tabela 3:</b> Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), razão média (RM), erro absoluto médio (EAM), raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) e índice de concordância de Willmott ("d" _"W" ) para todos os modelos avaliados de estimativa de radiação solar para Uruçuí-PI. HS: Modelo de Hargreaves-Samani, TR: Modelo de Thornton-Running, WS: Modelo de Weiss. ....	24
<b>Tabela 4:</b> Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), razão média (RM), erro absoluto médio (EAM), raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) e índice de concordância de Willmott ( $d_w$ ) para todos os modelos avaliados de estimativa de radiação solar para João Pessoa-PB.....	25

ARAÚJO, Maria Arcelina Pontes. **Avaliação dos modelos de estimativa de radiação solar para localidades úmidas e semiáridas.** Areia – PB, 2018. 48p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba.

## RESUMO

A radiação solar é o elemento meteorológico de extrema relevância para o desenvolvimento de culturas de interesse agrícola. O objetivo desse trabalho foi aplicar e avaliar modelos de estimativa da radiação solar incidente utilizando dados de temperatura do ar para as condições meteorológicas de João Pessoa-PB e Uruçuí-PI. Os dados meteorológicos foram obtidos nas estações meteorológicas automáticas do INMET, localizadas nas cidades de João Pessoa-PB e Uruçuí – PI. Foram aplicados dados dos anos de 2009 e 2010 da estação de Uruçuí, e de 2015 a 2017 da estação de João Pessoa. Em cada conjunto de dados foi realizada uma análise para excluir datas com dados faltosos ou com falhas nas leituras. Dessa forma, o conjunto de dados em Uruçuí contou de 693 dias e em João Pessoa 591 dias. Para aplicação dos modelos de estimativa da  $R_s$ , foi necessário estimar a radiação solar no topo da atmosfera ( $R_a$ ) e a radiação solar em dias de céu claro ( $R_{so}$ ). Após a determinação dessas variáveis implementou-se os modelos de estimativa de radiação solar incidente, os quais foram: Modelo de Hargreaves-Samani (HS), Modelo de Thornton-Running (TR) e o Modelo de Weiss (WS). O desempenho dos modelos foi baseado nos seguintes indicadores: Coeficiente de determinação da regressão linear ( $R^2$ ); Razão média (RM); Erro absoluto médio (EAM); Raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) e o índice de concordância de Wilmott (dW). Observou-se que para a localidade de Uruçuí-PI o desempenho dos modelos de TR e HS foram semelhantes entre si. Dois dos cinco índices indicaram estes modelos como mais adequados. O modelo menos indicado, portanto, foi o modelo de WS. Para a localidade de João Pessoa-PB quatro dos cinco indicadores recomendam a utilização do modelo de TR. A análise do desempenho dos modelos levou à concluir que tanto HS quanto TR não funcionam tão bem em condições tropicais nas quais a diminuição da radiação solar global ( $R_g$ ), em decorrência do aumento da nebulosidade ou da época do inverno, não ocorre juntamente com a redução da temperatura do ar local.

**Palavras chaves:** Radiação global, temperatura do ar, nebulosidade.

ARAÚJO, Maria Arcelina Pontes. **Assessing solar radiation models for moist and semiarid areas.** Areia – PB, 2018. 48p. Final Paper of Course Completion. (Graduation in Agronomy) –Federal University of Paraíba.

## ABSTRACT

Solar radiation is the most important weather element for the development of agricultural crops. The objective of this work was to apply and assessing models to estimation the solar global radiation, using air temperature data for the weather conditions of João Pessoa-PB and Uruçuí-PI, both regions in Brazil. Weather data were obtained by INMET meteorological stations, from the years 2009 and 2010 in Uruçuí, and from 2015 to 2017 in João Pessoa. In each data set, an analysis was performed to exclude missing or wrong data from the readings. Thus, the data set in Uruçuí counted 693 days and in João Pessoa 591 days. To apply the Rs estimation models, it was necessary to obtain the solar radiation at the top of the atmosphere ( $R_a$ ) and the solar radiation on clear sky days ( $R_{so}$ ). Next, the estimation models of incident solar radiation were implemented, which were: Hargreaves-Samani Model (HS), Thornton-Running Model (TR) and Weiss Model (WS). The models were assessed with the indicators: Coefficient of determination of the linear regression ( $R^2$ ); Mean ratio (RM); Mean absolute error (EAM); Square root of mean square error (RQME) and the Wilmott concordance index (dW). For Uruçui-PI, the TR and HS models performed similar to each other. Two of the five indices showed these models as the more adequate. The worst model, therefore, was the WS model. For the locality of João Pessoa-PB four of the five indicators recommend the use of the TR model. The analysis of the performance of the models led to the conclusion that both HS and TR do not work as well in tropical conditions in which the decrease of  $R_g$  due to increase cloudiness or winter season does not occur together with the reduction of air temperature local.

**Key words:** Global radiation, air temperature, cloudness

## 1. INTRODUÇÃO

A radiação solar é um elemento meteorológico de extrema relevância para o desenvolvimento de culturas de interesse agrícola, por ser fator limitante no seu processo de produção. O conhecimento das variações dos elementos meteorológicos, incluindo a radiação solar global ( $R_g$ ), é um importante instrumento na tomada de decisões relacionadas às atividades agropecuárias (FILHO, 2004).

A radiação solar global é, praticamente, a única fonte de energia para os processos fisiológicos e bioquímicos que ocorrem nos vegetais, sendo, portanto, o rendimento das culturas influenciado pela mesma (KUNZ, 2007). Outros aspectos da produção e fisiologia do vegetal também são dependentes da radiação solar. A evapotranspiração (ET), por exemplo, que é o processo que define a demanda hídrica das culturas, tem como principal fonte de energia o saldo de radiação na superfície, ou seja, depende substancialmente da radiação (ALLEN et al., 2011).

A utilização da radiação solar é de extrema importância em estudos de modelagem do crescimento, produção vegetal, estudos relacionados às mudanças climáticas, entre outros processos. Todavia, a quantificação da radiação solar global exige instrumentos de custo elevado, como radiômetros, actinógrafos e piranômetros, que requerem calibração e manutenção constantes. Tendo em vista que poucas estações meteorológicas possuem registros deste elemento meteorológico, se faz necessário para os locais onde não existe disponibilidade de dados de radiação solar a estimação deste elemento meteorológico (RIBEIRO et al., 2017).

Levando em consideração as medidas realizadas nas estações meteorológicas, a temperatura do ar é frequentemente observada, com uma ampla disponibilidade e facilidade para a sua obtenção, com dados instantaneamente disponíveis tornam os modelos baseados na temperatura do ar como vantajosos e de interesse para a estimativa de radiação solar global, os coeficientes empregados nos modelos podem ser ajustados para cada local específico e aplicados em locais com climatologia semelhante (ALMOROXET al., 2011).

Hargreaves e Samani (1982), formularam o modelo de estimativa da radiação solar, que utiliza a temperatura do ar diária, radiação extraterrestre e um coeficiente de ajuste. A diferença entre as temperaturas máxima e mínima está relacionada ao grau de cobertura de nuvens de uma localidade. Assim, a amplitude térmica diária pode ser usada como um indicador da fração de radiação extraterrestre que chega à superfície do solo. Allen (1997), propõe que este coeficiente de ajuste utilizado tem variação local, temporal e climática. Hargreaves (1994), recomendou a utilização do coeficiente de ajuste ( $K_r$ ) de 0,16 para regiões continentais e de 0,19 para regiões costeiras. Allen (1995), sugeriu estimar o  $K_r$  como função da altitude (LÊDO, 2012). O modelo de Thornton-Running (THORNTON e RUNNING, 1999) utiliza a amplitude térmica diária e mensal para determinação do coeficiente de

transmissividade atmosférica e o modelo de Weiss (WS) utiliza, além da amplitude térmica do ar a radiação solar no topo da atmosfera (BORGES, 2010).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

- Estimar modelos da radiação solar incidente utilizando dados de temperatura do ar para as condições meteorológicas de João Pessoa-PB e Uruçuí-PI.

### **2.2. Específicos**

- Obter os coeficientes de transmissividade atmosférica para as localidades avaliadas.
- Estimar a radiação solar incidente utilizando a temperatura média do ar.
- Avaliar e definir os modelos adequados de estimativa de radiação para uma localidade úmida e uma região semiárida.

## **3. REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1. Radiação solar**

A radiação solar global ( $R_g$ ), pode ser definida como o total de energia emitida pelo sol, que incide sobre a superfície terrestre. Como principal fonte primária de energia a partir da radiação solar é de onde quase todas as outras formas de energia são provenientes além de ser responsável pelo aquecimento da superfície terrestre resultando diversos fenômenos de caráter meteorológico como a evaporação com consequente formação de nuvens e precipitação. Além de também ser fonte de energia para o processo de fotossíntese, importante na reciclagem de  $CO_2$ . A  $R_g$  influencia também em outros processos ambientais relacionados à temperatura do ar e do solo, afetando a troca de calor por meio da evaporação e transpiração (SANTOS et al., 2017)

Mesmo sabendo que a radiação solar na superfície terrestre possa ser medida diretamente por intermédio de instrumentos, como o piranômetro, o elevado custo tanto para instalação quanto para manutenção (assistência especializada), principalmente quando se tem

interesse nas componentes da radiação difusa e direta, tem dificultado essas medições na maior parte do mundo (JERSZURKI, 2013).

A radiação solar é de imenso valor para várias áreas de conhecimento, se fazendo necessário saber-se a sua quantificação com maior frequência e em diferentes escalas de tempo, para assim poder se aplicar em estudos climáticos, engenharia, agricultura e recursos energéticos renováveis. Em estudos climáticos, a radiação solar global ( $R_g$ ) é a principal forçante natural do clima da terra. Na agricultura está diretamente ligada ao balanço hídrico, produtividade potencial e uso em modelos computacionais que simulam o crescimento e produtividade de culturas agrícolas (YANG et. al., 2006; HENG et. al., 2009).

A radiação solar é medida em estações meteorológicas por meio de radiômetros ou pode ser estimada a partir de dados de insolação solar, temperatura do ar, amplitude térmica e entre outros. Sabe-se que a rede de estações meteorológicas no Brasil ainda não é suficiente para abranger todo o território nacional e também escasso são as medidas convencionais com heliógrafos. Com a ausência em muitas localidades de instrumentos adequados para sua medição pode-se aplicar modelos para estimar a radiação solar a partir de dados de temperatura do ar, por exemplo, que são medidas obtidas com sensores mais simples e de baixo custo (OLIVEIRA et al., 2005; BORGES et al., 2010).

### **3.2. Modelos de estimativa**

Sabe-se Sabe-se que além da escassez de estações que afirmam esses parâmetros, as que existem estão centralizadas nas regiões mais desenvolvidas do país, enquanto, há grandes áreas agrícolas que não dispõem de dados climáticos completos (JERSZURKI, 2013).

A escolha por modelos de estimativas de radiação solar que de certa forma são mais simples se torna uma opção pela menor necessidade de informações climáticas, a sua execução é por meio de elementos meteorológicos mais comuns como temperatura (OLIVEIRA et al., 2005).

Com a existência de diversos modelos para a estimativa da radiação solar se torna natural a necessidade de execução em condições climáticas e agronômicas diferentes daquelas em que inicialmente foram criados ou utilizados, sendo por isso de extrema importância avaliar se o método escolhido se adaptará bem as condições climáticas do local (OLIVEIRA et al., 2001). Buscando eliminar-se o problema da variação dos locais para o emprego dos modelos de estimativa, vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para a estimativa da



Rs. Entretanto, frequentemente, necessitam de dados climáticos, que nem sempre estão disponíveis nas estações meteorológicas, que medem principalmente temperatura e precipitação, e necessitam também de calibração (BORGES et al., 2010).

A forma como o céu se apresenta nublado, parcialmente ou limpo são utilizados em algumas metodologias na obtenção da Rs (RICIERI, 1998). Já a diferença entre a temperatura do ar máximo e mínimo está relacionada ao grau de cobertura de nuvem em uma localização. A condição de céu claro tende à temperaturas altas durante o dia porque a atmosfera é transparente à radiação solar, como também é resultante em temperaturas baixas durante a noite, tendo em vista a forma com que a radiação solar se comporta nessas condições (ALLEN et al., 1998).

Para localidades com ausência de coleta de dados de radiação solar, pode-se estimá-la através de relações matemáticas empíricas, interpolação linear, imagens de satélites geostacionários e rede neural artificial, entre outros, conforme revisão feita por Liu et al. (2009). Esses métodos variam no grau de complexidade, dados de entrada e acurácia (ABRAHA & SAVAGE, 2008). Apesar disto, os métodos baseados nas relações empíricas são, em geral, mais atrativos devido à facilidade na aquisição dos dados. Os parâmetros comumente utilizados são: radiação incidente extraterrestre, insolação, temperatura do ar, nebulosidade, umidade relativa do ar, altitude, latitude e o número do dia do ano, podendo ser utilizados individualmente ou combinados entre si (BRISTOW & CAMPBELL, 1984; MENGES et al., 2006; LI et al., 2010; SILVA et al., 2012). Dentre os diversos modelos matemáticos que estimam a radiação solar incidente (Rs), destaca-se a equação desenvolvida por Hargreaves e Samani (1982), baseada na amplitude térmica diária, radiação solar no topo da atmosfera ( $R_a$ ) e no coeficiente de ajuste ( $K_{rs}$ ).

Pode-se citar o modelo proposto por Bristow e Campbell o qual tem sido considerado em alguns casos que, utiliza medidas máximas e mínimas diárias de temperatura correlacionando aos valores diários de  $R_a$  (radiação solar no topo da atmosfera). O modelo de Bristow e Campbell foi aplicado em diversos estudos em vários ambientes, como em parte dos Estados Unidos, Austrália, Escócia (SANTOS et al., 2017). Como também pela equação proposta por Angström – Prescott (ANGSTRÖM, 1924), que utiliza a insolação (horas de brilho solar fornecida pelo heliógrafo) para estimar a radiação solar incidente (RIBEIRO et al., 2017).

Silva et al. (2009) propuseram para duas cidades do Ceará a utilização de modelos de estimativa de radiação solar, nesse caso um proposto por Hargreaves-Samani (1982) que é baseado nas temperaturas máximas e mínimas do ar. Assim como também para o semiárido de Alagoas, Santos et al. (2013) utilizaram o mesmo modelo para três regiões do estado. Lêdo et al. (2012) para outra localidade do Ceará também executou tal modelo para as condições climáticas do diferentes das demais localidades citadas. A estimativa de radiação solar através de modelos empíricos se tornou uma alternativa viável caso haja resposta significativa para as variáveis testadas e uma boa adequação do modelo escolhido para a localidade em questão.

Portanto, Hargreaves & Samani (1982), se tornaram uns dos primeiros a propor estimativas de radiação solar incidente a partir da temperatura do ar. Em seu modelo de estimativa utilizam um coeficiente de calibração levando em consideração a região que a localidade está inserida. Segundo o modelo, entende-se, como região interior aquela em que os padrões do tempo meteorológico são dominados por grandes massas de terra e seu coeficiente recomendado é de 0,16 e como região costeira aquela cujos padrões do tempo são dominados pela proximidade com grandes massas de água com seu coeficiente recomendado de 0,19 (BORGES, 2010).

Tendo em vista tais necessidades encontra-se também o modelo de Thornton-Running (Thornton & Running, 1999), que utiliza a amplitude térmica diária e mensal para determinação do coeficiente de transmissividade atmosférica (BORGES, 2010).

Através de tais conhecimentos buscou-se utilizar o modelo mais simples entre os avaliados por Weiss et al. (2001), em várias regiões agrícolas dos Estados Unidos, utilizando além da amplitude térmica do ar mensal, a radiação solar no topo da atmosfera para estimativa da transmissividade atmosférica ( $K_t$ ) (BORGES, 2010).

### **3.3. Indicadores de desempenho**

O coeficiente de determinação de regressão linear ( $R^2$ ), é sempre um número positivo entre zero e um, quanto maior for o  $R^2$ , melhor será o poder de explicação do modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. O índice “d” de Willmott (1981), também chamado de índice de concordância de Willmott, informa o ajuste entre os valores medidos e observados, variando de zero a um, quanto mais próximo de um melhor a concordância dos dados, assim

como também a razão média (RM) dos seus resultados esperados são em torno de um (JERSZURKI, 2013).

Já para o erro absoluto médio (EAM) e a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME), quando observa-se valores em torno de zero são indicativos de um bom desempenho do modelo. Estes índices são interessantes pois apresentam a mesma unidade da variável estimada.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Dados meteorológicos utilizados**

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos nas estações meteorológicas automáticas do INMET, localizadas nas cidades de João Pessoa-PB (7,165409° S, 34,815627° W, altitude 34 metros) e Uruçuí - PI (7,441420° S, 44,345055° W, altitude 399 metros). A cidade de Uruçuí - PI tem um clima tropical, onde o verão possui uma maior pluviosidade que o inverno, o clima é classificado como Aw que é um clima tropical chuvoso com chuvas no verão segundo a Köppen e Geiger, com uma temperatura média de 27.2 °C e uma pluviosidade média anual de 1069 mm. João Pessoa - PB, por sua vez possui também um clima tropical onde existe uma curta época seca e não é muito definida, enquanto que, na maioria dos meses do ano existe uma pluviosidade significativa. O clima é classificado como Am que é um clima tropical chuvoso assim como Uruçuí mas de de monção, breve estação seca com chuvas intensas durante o resto do ano, segundo a Köppen e Geiger, a temperatura média anual em João Pessoa é 25.2 °C com uma pluviosidade média anual de 1888 mm.

Foram aplicados dados dos anos de 2009 e 2010 da estação de Uruçuí, e de 2015 a 2017 da estação de João Pessoa. Em cada conjunto de dados foi realizada uma análise para excluir datas com dados faltosos ou com falhas nas leituras. Dessa forma, o conjunto de dados em Uruçuí contou de 693 dias e em João Pessoa 591 dias.

### **4.2. Determinação da radiação no topo da atmosfera e transmissividade atmosférica**

Para aplicar os modelos de estimativa da  $R_s$ , é preciso estimar a radiação solar no topo da atmosfera ( $R_a$ ) e a radiação solar em dias de céu claro ( $R_{so}$ ), conforme Allen et al. (1996). Para tanto determina-se a transmissividade atmosférica, pelas seguintes etapas:

Determinação da pressão atual de vapor d'água ( $e_a$ , em kPa), utilizando dos dados da temperatura do ponto de orvalho média ( $T_d$ ):

$$e_a = 0,6108 \times 10^{\left[ \frac{7,5T_d}{237,3T_d + 273} \right]} \quad (1)$$

Os valores de água precipitável na atmosfera ( $w$ ), obtidos em mm, foram calculados através da Eq. 2, utilizando os valores da pressão atual de vapor d'água e pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ).

$$w = 0,14 e_a P_{atm} + 2,1 \quad (2)$$

O ângulo do sol acima do horizonte, obtido em radianos, foram calculado através da equação 3, onde utilizou-se da latitude( $\phi$ ) em radianos e o número de ordem do ano (DDA).

$$\beta = \text{sen} \left[ 0,85 + 0,3 \phi \text{sen} \left( \frac{2\pi DDA}{365} - 1,39 \right) - 0,42 \phi^2 \right] \quad (3)$$

Para o cálculo do coeficiente de transmissividade atmosférica para radiação direta ( $K_b$ ), pela Eq. 4, utiliza-se a pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ), o ângulo do sol acima do horizonte ( $\beta$ ), a água precipitável na atmosfera ( $w$ ) e do coeficiente de turbidez atmosférica ( $K_{tb}$ ) que foi deferido igual a 1,0 para as duas localidades.

$$K_b = 0,98 \exp \left[ \frac{-0,00146 P_{atm}}{K_{tb} \text{sen} \beta} - 0,075 \left( \frac{w}{\text{sen} \beta} \right)^{0,4} \right] \quad (4)$$

O coeficiente de transmissividade atmosférica,  $K_d$  para radiação difusa é dado por:

$$K_d = 0,35 - 0,6 K_b \quad (5)$$

Por fim, a radiação solar em dia claro ( $R_{so}$ ) foi obtida pela Eq. 6:

$$R_{so} = (K_b + K_d) R_a \quad (6)$$

#### 4.3. Modelos de estimativa:

Após a determinação dessas variáveis implementou-se os modelos de estimativa de radiação solar incidente, os quais foram:

a) Modelo de Hargreaves-Samani (HS):

O presente modelo estima a radiação por meio da Eq. (7); que é dado por:

$$R_s = K_r (T_x - T_n)^{0,5} \cdot R_a \quad (7)$$

Em que:

Kr: coeficiente de calibração, adimensional. Utiliza-se os valores de 0,16 para localidades no interior dos continentes (Uruçuí) e 0,19 para região costeira (João Pessoa);

Tx: Temperatura máxima, °C;

Tn: Temperatura mínima, °C;

Ra: radiação solar no topo da atmosfera, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>.

b) Modelo de Thornton-Running (TR):

Eq. 8. Utiliza-se a amplitude térmica diária e mensal para determinação do coeficiente de transmissividade atmosférica. O coeficiente B (Eq. 8) é baseado nas normais climatológicas do local através da amplitude térmica mensal média ( $\Delta T_m$ ), da pela Eq. 9. Neste trabalho, utilizou-se a amplitude térmica mensal dentro do período avaliado.

$$R_s = R_{so} [1 - 0,9 \exp(-B(T_x - T_n)^{1,5})] \quad (8)$$

$$B = 0,031 + 0,201 \exp(-0,185 \Delta T_m) \quad (9)$$

c) Modelo de Weiss (WS):

Eq. 10, utiliza-se além da amplitude térmica do ar a radiação solar no topo da atmosfera para estimativa de  $R_s$ .

$$R_s = 0,75 \left[ 1 - \exp\left(-0,226 \frac{(\Delta T)^2}{R_a}\right) \right] R_a \quad (10)$$

$\Delta T$  é determinado pela Equação 11, em que ( $T_x$ ) é igual a temperatura máxima do ar, ( $T_n$ ) é igual a temperatura mínima do ar e i um subscrito indicativo do dia atual.

$$\Delta T = T_{xi} - \left( \frac{T_{n(i)} + T_{n(i+1)}}{2} \right) \quad (11)$$

#### 4.4. Indicadores de desempenho:

Como proposto por BORGES, (2010), o desempenho dos modelos citados será baseado nos seguintes indicadores: Coeficiente de determinação da regressão linear -R<sup>2</sup>; Razão média-RM (Equação 12); Erro absoluto médio-EAM (Equação 13); Raiz quadrada do quadrado médio do erro-RQME (Equação 14) e o índice de concordância de Wilmott-dW (Equação 15). Como também nas médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação observados e estimados para os dados utilizados.

$$RM = \frac{E_i}{O_i} \quad (12)$$

Onde; E<sub>i</sub> – valor estimado (MJ<sup>m-2 d-1</sup>) e O<sub>i</sub> – valor observado (MJ<sup>m-2 d-1</sup>).

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)}{N} \quad (13)$$

Onde; N é número de observações.

$$RQME = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{N} \right]^{0,5} \quad (14)$$

$$d_w = 1 - \left[ \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{N}}{\sum_{i=1}^N (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (15)$$

Onde;  $\bar{O}$  – média dos valores observados (MJ<sup>m-2 d-1</sup>).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 encontram-se os valores observados e os estimados com suas respectivas análises de média, desvio padrão, valores máximos e mínimos do período de dados utilizados

e o coeficiente de variação para a cidade de Uruçuí-PI. Sabe-se que, quanto mais próximos de zero for o desvio padrão, mais homogêneo foram os dados em questão, como também o valor do coeficiente de variação (CV%). Partindo disto, o CV% encontrado tem-se um resultado de maior variação do modelo de WS em torno de 54%, enquanto que, os modelos de HS e TR obtiveram valores menores de 15,5% de variação.

No desvio padrão também pôde-se observar um comportamento semelhante com menor variação dos modelos de HS e TR. Para a localidade de João Pessoa (Tab. 2), observou-se um comportamento semelhante ao de Uruçuí para os modelos de estimativa, mas com uma redução no coeficiente variação dos dados. Ainda assim com essa redução o modelo de WS obteve um CV% em torno de 43%, uma variância alta. Os modelos de HS e TR obtiveram uma diminuição da variação e do desvio padrão e seguiram com um melhor desempenho comparado ao de WS.

Para ambas as localidades, o CV dos dados observados acima de 20% deve-se à variação da Rg em decorrência da nebulosidade. Com excessão do modelo WS, os demais modelos tiveram menor CV do que o conjunto de dados observados, visto que a temperatura do ar não sofreu grandes variações no período analisado.

	<b>Média</b>	<b>Desvio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>CV %</b>
<b>Observado</b>	19,59	4,89	28,72	4,43	24,96
<b>Modelo HS</b>	18,87	2,51	24,78	10,51	13,32
<b>Modelo TR</b>	20,42	3,11	26,49	7,30	15,25
<b>Modelo WS</b>	9,99	5,46	26,90	1,68	54,62

**Tabela 1-** Valores de médias, máximos e mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) para dados observados e para os modelos de estimativa de radiação solar para Uruçuí-PI.

	<b>Média</b>	<b>Desvio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>CV %</b>
<b>Observado</b>	21,30	5,20	29,98	1,75	24,40
<b>Modelo HS</b>	17,59	1,96	23,34	9,68	11,12
<b>Modelo TR</b>	23,53	2,52	27,18	18,74	10,69
<b>Modelo WS</b>	7,05	3,04	25,55	1,04	43,07

**Tabela 2-** Valores de médias, máximos e mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) para dados observados e para os modelos de estimativa de radiação solar para João Pessoa-PB.

A Tabela 3, apresenta os valores dos indicadores de desempenho para os modelos nas duas localidades testadas. Em relação ao coeficiente de regressão linear ( $R^2$ ) valores mais próximos de um indicam maior a concordância entre valores medidos e estimados. Observa-se um pior desempenho para as condições de Uruçuí para o modelo de Weiss com valor próximo a zero ( $R^2=0,0018$ ), enquanto que para os modelos de Hargreaves-Samani (HS) e Thornton-Running (TR) observou-se um comportamento mediano semelhante, porém com correlações baixas, com valores de 0,4173 e 0,4377, respectivamente. Para João Pessoa, na Tabela 4, os valores de  $R^2$  se comportaram de forma que o modelo de WS também se mostrou com nenhuma eficiência ( $r^2 = 0,0144$ ), já para os modelos de HS e TR obteve-se valores iguais a 0,2023 e 0,2537, respectivamente, não apresentando correlação. Na Figura 1 estão os gráficos com a relação entre  $R_g$  observada e estimada, com as respectivas equações e coeficientes de determinação.

Modelo	Indicadores de desempenho				
	$R^2$	RM	EAM	RMQE	d
HS	0,4173	1,03	3,18	3,85	0,71
TR	0,4377	1,10	2,86	3,76	0,77
WS	0,0018	0,56	10,10	11,98	0,36

**Tabela 3-** Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), razão média (RM), erro absoluto médio (EAM), raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) e índice de concordância de Willmott ( $d_w$ ) para todos os modelos avaliados de estimativa de radiação solar para Uruçuí-PI. HS: Modelo de Hargreaves\_Samani, TR: Modelo de Thornton-Running, WS: Modelo de Weiss.

Modelo	Indicadores de desempenho				
	$R^2$	RM	EAM	RMQE	d
HS	0,2023	0,86	3,36	5,05	0,55
TR	0,2537	1,14	1,82	3,51	0,59
WS	0,0144	0,33	15,47	16,50	0,34

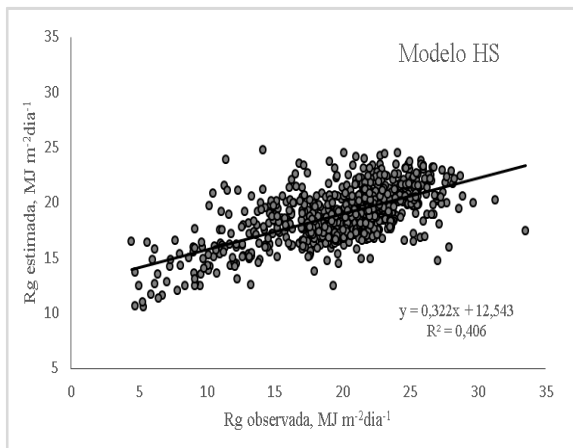
**Tabela 4-** Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), razão média (RM), erro absoluto médio (EAM), raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) e índice de concordância de Willmott ( $d_w$ ) para todos os modelos avaliados de estimativa de radiação solar para João Pessoa-PB

Para a razão média (RM), entende-se que valores abaixo de 1,0 tendem a subestimar o dado observado, nesse caso, os valores de radiação solar. Como também valores acima de 1,0 tendem a superestimá-los. Portanto, para a cidade de Uruçuí, (Tab. 3), os modelos

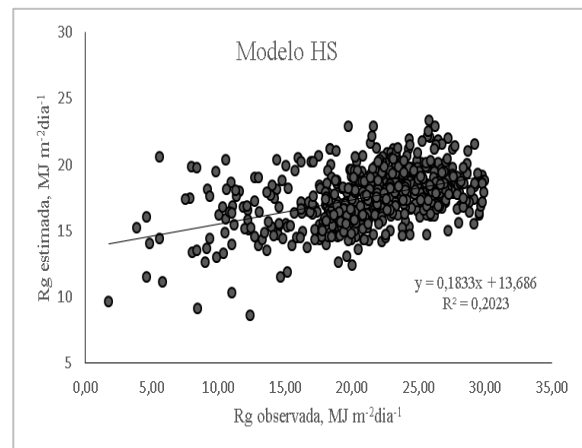


Hargreaves-Samani e Thornton-Running superestimaram a radiação solar, em média, 3% e 10%, respectivamente, mostrando uma efetividade na estimativa de radiação solar através deles. Já o modelo de Weiss (WS), em mais uma análise apresentou uma subestimação maior que 50%, caracterizando uma falta de efetividade no modelo. Para a localidade de João Pessoa (Tab. 4), obteve-se um comportamento um pouco diferenciado em relação aos modelos onde observou-se uma subestimação nos valores de estimativa de radiação solar tanto para o modelo de WS (66%) como para o de HS (14%), já o modelo de TR obteve-se uma superestimativa em torno de 14% sendo, ainda assim, satisfatória.

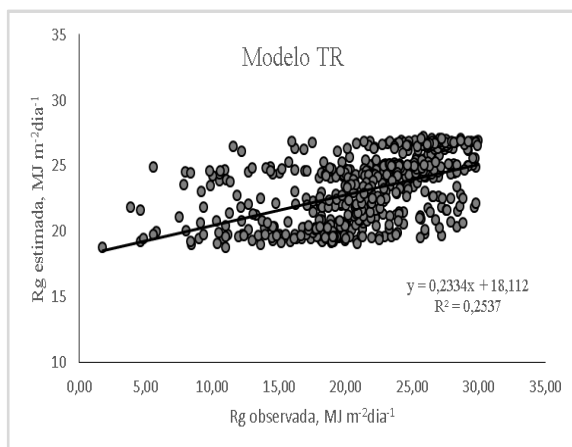
**A. Uruçuí/PI**



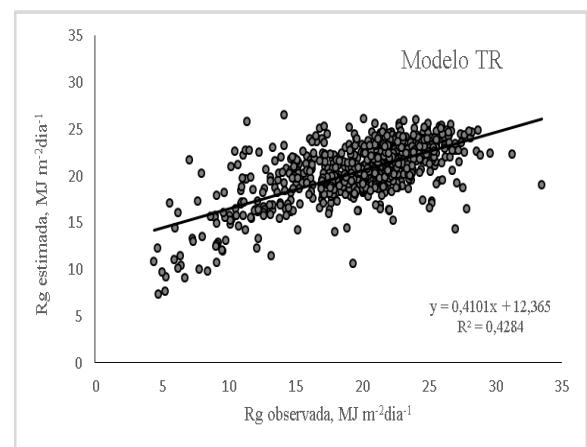
**D. João Pessoa/PB**



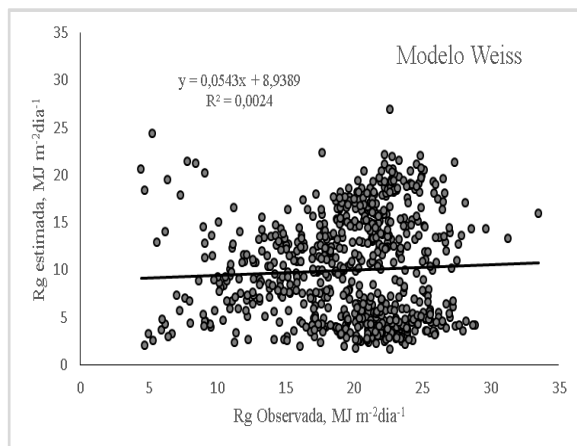
**B.**



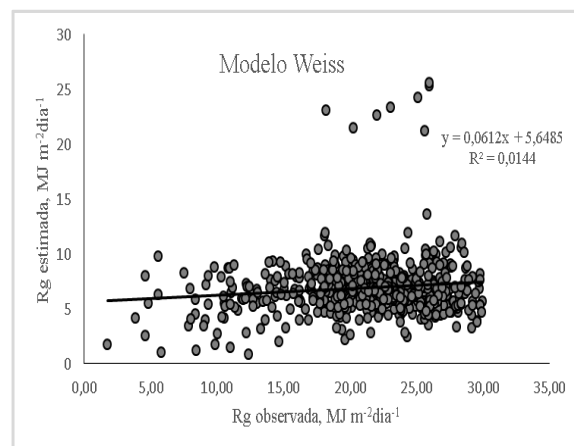
**E.**



C.



F.



**Figura 1-** Gráficos de regressão linear entre radiação solar observada e estimada para os modelos de estimativa, A,B e C para a localidade de Uruçui-PI e D, E e F para a localidade de João Pessoa - PB. Sendo HS: Modelo de Hargreaves\_Samani, TR: Modelo de Thornton-Running, WS: Modelo de Weiss.

No que diz respeito ao erro absoluto médio (EAM) e a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMQE) valores que se mais se aproximam de zero refletem uma estimativa autentica dos valores de radiação solar, nesse caso. Portanto, com os dados obtidos por estimativa utilizando os modelos observa-se que para as condições tanto de Uruçui-PI (Tab. 3), quanto para a de Joao Pessoa-PB (Tab. 4), o modelo de WS teve o pior desempenho não se mostrando eficiente com valores aquém dos esperados. O modelo de HS teve um desempenho um pouco melhor para as duas localidades, mas o que teve melhores índices foi o de TR, com valores mais próximos a zero comparado a outros modelos.

O índice “d” de Willmott propõe a relação que quanto mais próximos de um, os valores estimados estão coerentes com os observados. Para a cidade de Uruçuí, (Tab. 3), os índices de concordância (dw) foram satisfatórios para os modelos de HS e TR. O modelo de WS, assim como nos outros indicadores de desempenho, apresentou valores muito baixos. Para João Pessoa (Tab. 4), o desempenho do índice de Willmont foi um pouco inferior aos observados em Uruçui (Tab. 3).

A partir dos valores expostos nas tabelas observa-se que para a localidade de Uruçui-PI dois dos cinco fatores indicam o modelo de HS, fatores esses que são o RM e dw, mesmo não apresentando um  $R^2$  alto. Como também dois dos quatro indicativos indicam o modelo de TR, fatores esses que são EAM e RMQE, não apresentando o  $R^2$  alto. O modelo menos indicado, portanto, é o modelo de WS.

Para a localidade de João Pessoa-PB quatro dos cinco indicadores recomendam a utilização do modelo de TR com uma sobrestimativa de RM inferior a 15% entre valores observados e estimados, e valores mais satisfatórios de EAM, RMQE e dw de acordo com as estimativas dos modelos executados. Para todas as situações analisadas não se verificou um maior valor de  $R^2$ .

Silva et al. (2009) obtiveram com o método de Hargreaves-Samani um índice de confiança considerado muito bom em estudo realizado para o município de Sobral-CE. No mesmo estudo o modelo de HS foi considerado ótimo para a cidade de Tauá-CE. Tal método registrou um desempenho satisfatório em ambos municípios, tornando confiável a sua utilização para os agricultores de ambas as regiões pelo fato de obterem dados médios de velocidade do vento registrados correspondentes aos períodos chuvoso e seco durante todo o período avaliado.

Para o semiárido de Alagoas, Santos et al. (2013) encontraram para o modelo original de Hargreaves-Samani para três regiões estudadas estimativas diferindo estatisticamente das medidas, somente nos meses de maio e junho. Ao simular a irradiação solar ocorreram subestimativas (mês de maio) e superestimativas (mês de junho). A superestimativa pode ser ocasionada pelo aumento da reflexão da radiação solar a partir de cobertura de nuvens e pelo papel decrescente de dispersão atmosférica devido ao menor ângulo de declinação solar e maior massa ótica (SPOKAS e FORCELA, 2006), esta influência ainda é pouca estudada. A superestimativa pode ser influenciada pela cobertura de nuvens, isto se atribui aos dias parcialmente nublados sem precipitação. Por apresentar clima semiárido, as chuvas nessas regiões ocorrem em pequenos intervalos de tempo com grande intensidade.

Em Barbalha-CE, Lêdo et al. (2012) concluiu que, conforme as condições climáticas locais, o emprego do modelo proposto por Hargreaves-Samani para as estimativas da radiação solar global diária é inviável, quando não se dispor de valores de  $R_s$ , uma vez que os valores estatísticos foram muito baixos, independente do coeficiente de ajuste empregado no método.

Tendo em vista o desempenho dos modelos analisados nesse trabalho, propõem-se justificar o resultado pelo fato de que, em Uruçui-PI, independente da nebulosidade, as temperaturas continuam altas, especialmente porque a estação chuvosa ocorre no período primavera-verão, com temperaturas anuais em torno de máxima 38,8°C e mínima 17,3°C.

Sabendo que os modelos de estimativa são baseados nos valores de temperatura do ar, nessas condições ocorre uma superestimativa da  $R_g$ .

As maiores discrepâncias entre valores observados e estimados ocorreram exatamente nos dias de menor transmissividade atmosférica, quando a relação  $R_g/R_a$  foi inferior a 0,4. Para a localidade de João Pessoa têm-se uma interferência direta da proximidade com o oceano ocorrendo, portanto, variação do microclima local afetando assim parâmetros como nebulosidade, que interferem diretamente na transmissividade atmosférica. Conforme observado na análise de variância, os modelos HS e TR tiveram menos CV do que os dados observados, justamente por não preverem a diminuição da  $R_g$  em condições de nebulosidade, ainda que as temperaturas mantenham-se altas.

## **6. CONCLUSÕES**

Para a localidade de João Pessoa-PB o modelo de Thornton-Running demonstrou-se satisfatório, seguido pelo o modelo de Hargreaves-Samani. O modelo de Weiss demonstrou o pior desempenho entre os três não servindo para a estimativa da radiação solar global para essa localidade.

Para a cidade de Uruçuí-PI o desempenho dos modelos de Thornton-Running e Hargreaves-Samani foram semelhantes entre si, enquanto que, o modelo de Weiss também foi considerado impróprio para estimar a radiação global.

A análise do desempenho dos modelos levou à concluir que tanto HS quanto TR não funcionam tão bem em condições tropicais nas quais a diminuição da  $R_g$ , em decorrência do aumento da nebulosidade ou da época do inverno, não está associada à diminuição significativa da temperatura do ar.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABRAHA, M. G., Savage, M. J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.148, p.401–416, 2008.

ALLEN, R. G. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 2, n. 2, p. 56-97, 1996.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ASSIS, F.N. de, MENDEZ.M. E. G. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 2, n. 7, p. 797-800, 1989.

BRISTOW, K. L.; Campbell, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. Agricultural and Forest Meteorology, v.31, p.159-166, 1984.

BORGES, V.P., OLIVEIRA, A.S., FILHO, M.A.C., SILVA, T.S.M., PAMPONET, B.B. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.1, p.74–80, 2010. Campina Grande, PB.

BESHARAT F.; Dehghan A. A.; Faghih A. R. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21, 798-821. 2013.

CLIMATE-DATA.ORG. Clima Uruçui-PI. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/location/42385/>> Acessado em: 20 de abril de 2018.

CLIMATE-DATA.ORG. Clima João Pessoa –PB. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/location/4983/>>. Acessado em: 20 de abril de 2018.

FILHO, A.C.; MATZENAUER, R.; TRINDADE, J.K. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.39, n.12, p.1157-1166, dez. 2004.

FRANÇA, S., BERGAMASCHI, H., ROSA, L.M.G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999.

HARGREAVES, G. H. Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe. Logan, Utah: Departmental Paper, Department Biology and Irrigation Engineering, Utah State University, 1994.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Reston, v. 108, p. 225-230, 1982.

HENG L. K.; Steduto P.; Rojas – Lara B.; Raes D.; Fereres E. (2009). Aqua Crop – The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101, 448-459.

JERSZURKI, Daniela; SOUZA, Jorge Luiz Moretti de. Parametrização das equações de Hargreaves & Samani e Angström-Prescott para estimativa da radiação solar na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 383-389, Mar. 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782013000300002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782013000300002&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 05 de junho de 2018.

KUNZ, J.H.; BERGONCI, J.I.; DALMAGO, G.A.; HECKLER, B.M.M.; COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos de solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília v.42, n.11, p.1511-1520, nov.2007.

LÊDO, E. R. F. Avaliação de modelo de estimativa da radiação solar global (Rs) com base na amplitude térmica In: *Conex. Ci. e Tecnol. Fortaleza/CE*, v. 6, n. 1, p. 15-26, mar. 2012.

LIU, X.; Mei, X.; Li, Y.; Wang, Q.; Jensen, R. J.; Zhang, Y.; Porter, J. R. Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.149, p.1433-1446, 2009.

LI, Huashan; Ma, W.; Lian, Y.; Wang, X. Estimating daily global solar radiation by day of year in China. *Applied Energy*, v.87, p.3011-3017, 2010.

MENGES, H. O.; Ertekin, C.; Sonmete, M. H. Evaluation of global solar radiation models for Konya, Turkey. *Energy Conversion and Management*, v.47, p.3149-3173, 2006.

MUBIRU J.; Banda E. J. K. B. Estimation of monthly average daily global solar irradiation using artificial neural networks. *Solar Energy*, 82, 2, 181–187. 2008.

OLIVEIRA, R.Z.; OLIVEIRA, L.F.C.; WEHR, T.H.; BORGES, L.B.; BONOMO, R. Comparação de metodologia de estimativa da evapotranspiração de referência para Goiânia, GO. *BioscienceJournal*, v. 21, n. 3, p. 19-27, 2005.

RICIERI, R. P. Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa. 1998. 81 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 1998.

OLIVEIRA, L.F.C.; CARVALHO, D.F.; ROMÃO, P.A.; CORTÊS, F.C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v.31, n.2, p.121-126, 2001.

OLIVEIRA, D. E. & FERREIRA, C. C. M.. Estimativa da distribuição do balanço de radiação global na bacia hidrográfica do rio paraibuna, mg/rj, e suas correlações com atributos do meio



físico. 2008. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/labcaa/files/2008/08/Mapeamento-da-radia%C3%A7%C3%A3o-global-da-Bacia-Hidrogr%C3%A1fica-do-Rio-Para%C3%ADbuna-corrigido1.pdf>>. Acessado em 05 de junho de 2018.

OLIVEIRA, R.Z.; OLIVEIRA, L.F.C.; WEHR, T.H.; BORGES, L.B.; BONOMO, R. Comparação de metodologia de estimativa da evapotranspiração de referência para Goiânia, GO. Bioscience Journal, v. 21, n. 3, p. 19-27, 2005.

PERES, J. G., BOSCHI, R. S., SOUZA, C. F.. Avaliação de modelos agrometeorológicos que utilizam a amplitude térmica do ar atmosférico para a estimativa das radiações global e líquida. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.10, nº.4, p. 715 - 725, 2016 ISSN 1982-7679 (On-line) Fortaleza, CE, INOVAGRI – <http://www.inovagri.org.br>.

RIBEIRO, A. de A. et al. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação no Estado do Piauí, Brasil. Embrapa Meio-Norte-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2018.

SANTOS et al., 2013. Estimativa da irradiação solar global horária a partir da temperatura do ar para o semiárido de Alagoas, Brasil. Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 32, pp. 19 - 28, 2013 / Impreso en la Argentina / ISSN 0328-932X.

SANTOS, Paulo Guilherme Silva; ARAÚJO, Valdenildo Alves; QUERINO, Carlos Alexandre Santos. Radiação solar global diária para o município de Humaitá – AM estimada pelo modelo de Bristow e Campbell. Educamazônia - Educação, Sociedade e Meio Ambiente, [S.l.], v. 20, n. 1, Jan-Jun, p. 173-185, jun. 2018. ISSN 2358-1468. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufam.edu.br/educamazonia/article/view/4623>>. Acesso em: 11 jul. 2018.

SILVA et al., 2009. Estimativa da  $E_{to}$  pelos métodos Penman-Monteith FAO 56 e Hargreaves-Samani a partir de dados de  $T_x$  e  $T_n$  para Sobral e Tauá no Ceará. Revista ACTA Tecnológica - Revista Científica - ISSN 1982-422X , Vol. 5, número 2, jul-dez. 2010.

SILVA, C. R., SILVA, V. J., JÚNIOR, J. A. & CARVALHO, H.P. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.16, n.3, p.281–288, 2012 Campina Grande, PB, UAEA/UFCG.

WEISS A. y Hays C. J. (2004). Simulation of daily solar irradiance. Agricultural and Forest Meteorology, 123, 187-199.

YANG H.; Dobermann A.; Cassman K. G.; Walter D. (2006). Features, Applications, and limitations of the hybrid-Maize simulation model. Agronomy Journal, 98, 737-748.